

유한요소해석을 이용한 이물질이 고무오링과  
구조물에 미치는 영향과 성능 연구백인석<sup>1</sup> · 이희장<sup>2</sup> · 이석순<sup>1,†</sup><sup>1</sup>경상대학교 기계공학과, ERI<sup>2</sup>씰링크 주식회사A Finite Element Analysis of Elastomeric O-ring Performance and Structure  
when subjected to Foreign ObjectsInseok Pack<sup>1,†</sup>, Heejang Rhee<sup>2</sup> and Seoksoon Lee<sup>1,†</sup><sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang University,<sup>2</sup>Sealink Corporation

## Abstract

Elastomeric o-ring performance and structure when subjected to a foreign object is studied using finite element analysis (FEA). Elastomeric o-rings have been studied using 2D analysis for a long time. Contact pressure is an important factor in o-ring design. When contact pressure is lower than applied pressure, leaking, vibration, and noise can occur; resulting in decreased output. In this study, we compared 2D and 3D analyses of elastomeric o-rings. Similar results were shown for 2D and 3D contact pressure. However, when an o-ring encounters foreign object matter, 3D analysis is required because contact pressure in every direction needs to be considered. We determined the influence of foreign matter on o-ring performance and structure by analyzing 10 cases with different clearances in a 3D model. Therefore, an o-ring encountering foreign object matter must be analyzed in 3D with the result included in the o-ring design.

## 초 록

유한요소해석을 이용하여 이물질이 고무 오링과 구조물에 미치는 영향과 성능을 연구했다. 오래전부터 2D 해석을 이용하여 초탄성 오링을 연구해왔다. 오링 설계 시, 접촉응력은 중요한 설계 요소이다. 접촉 응력이 가해진 압력보다 낮으면 누수, 진동, 소음, 출력 저하의 원인이 된다. 이 연구에서는 초탄성 오링을 2D와 3D로 해석하고 결과를 비교한다. 2D와 3D의 접촉 응력 결과는 거의 비슷하게 나타난다. 이물질이 있는 오링은 3D로 모델링해야하는데 모든 방향의 접촉 응력을 고려해야하기 때문이다. 3D 해석에서 간극을 달리하여 10가지 경우로 나누어 이물질이 오링과 구조물에 미치는 영향을 확인했다. 또한 접촉 응력이 가해진 압력보다 높은지 확인하였다. 따라서, 이물질이 포함된 오링은 3D 모델로 해석되어야하며 이러한 결과는 오링 설계에 포함된다.

**Key Words** : elastomeric o-ring(초탄성 오링), 2D analysis, 3D analysis, foreign objective(이물질), noise(소음), leaking(누수), vibration(소음), output-decrease(출력 저하), design factor(설계 요소)

## 1. 서 론

Figure 1 과 같은 오링은 오늘날 가장 광범위하게 사용되는 씨일이다. 이러한 씨일의 가장 큰 사용 목적

은 윤활유나 작동유체의 누설과 이물질이 기계내부로 침입하는 것을 방지하기 위함이고 오링의 모습을 Fig. 2 에서 확인할 수 있다. 오링의 설계 오류가 초래되는 문제점의 예는 1986년 챌린저호의 폭발이 대표적이다. 미항공우주국(NASA)을 비롯한 연구 기관들은 그 중요성을 인식하고 막대한 연구비를 투입하여 오링의 기밀 성능에 대한 연구를 수행해왔다.[1,2]

Received: Nov. 24, 2016 Revised: Feb. 20, 2017 Accepted: Feb. 21, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-55-772-7622, E-mail: leess@gsnu.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

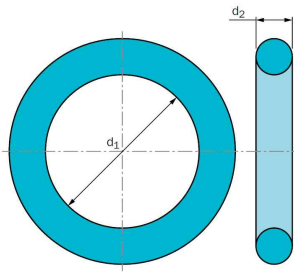


Fig. 1 The dimension of the O-ring

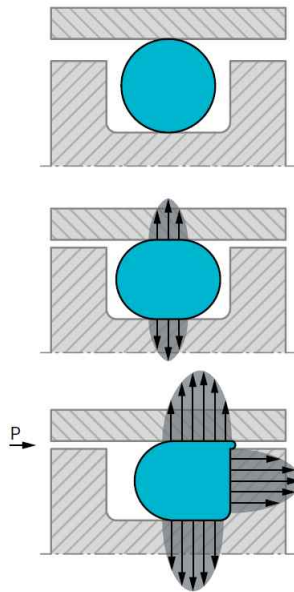


Fig. 2 O-ring sealing forces

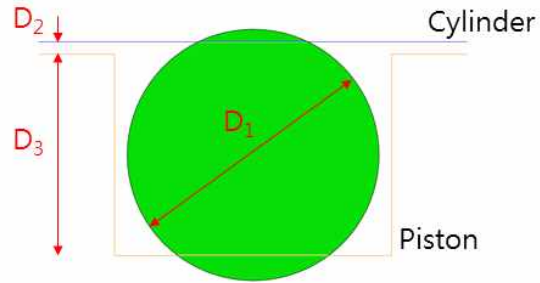
이 연구는 대부분 2D 해석을 이용하였고 오늘날까지 이용되어지고 있다. 오늘날 수치해석 프로그램과 컴퓨터는 비약적으로 발전하였다. 그럼에도 씨일 연구의 대다수가 2D 해석을 이용하는 것은 시간적 비용 측면에서 저렴하기 때문일 것이다. 본 연구에서는 2D와 3D의 von Mises 응력과 접촉 응력(Contact pressure) 결과 차이를 검토하고 이물질이 성능에 미치는 영향을 알아보려고 한다. 이 때, 성능은 누설 여부와 구조물에 미치는 응력이다.

누설은 Leachy 등의 실험 결과에 따르면 작용 압력이 접촉 응력보다 크면 발생한다고 되어있다. 그리고 구조물에 미치는 영향은 발생하는 응력에 따른 파손 및 변형을 알아보려고 한다.[3-6]

본 논문에서는 KS와 JIS규격을 참고하여 오링 선택과 간단하게 구조물을 설계하여 연구를 진행하였다.

찌그러짐(mm)	$\sigma = W - H$	
찌그러짐율(%)	$\frac{\sigma}{W} \times 100$	
충진율(%)	$\frac{\pi/4 \times W^2}{G \times H} \times 100$	

Fig. 3 Rule of the o-ring design



$D_1 = \varnothing 5.00 \text{ mm}$

$D_2 = 0.25, 0.50, 0.75 \text{ mm}$

$D_3 = 4.00 \text{ mm}$

Kinematic friction coefficient = 0.1

Fig. 4 Drawing of analysis model (2D, 3D)

Figure 3 에서 오링 선정법을 발췌하였고 2D와 3D 해석 모델을 선정하고 해석을 수행하였다.

지금까지의 연구들은 실제 현상과 차이를 두고 있지만, 본 논문에서는 현실과 가깝게 연구를 진행하였다.[7,8]

이에 본 논문에서 초탄성체인 오링과 탄성체인 이물질, 탄성체 이물질과 탄성체 구조물, 초탄성체 오링과 탄성체 구조물 사이의 접촉 문제를 간극 별로 나누어 연구하여 성능에 대해서 연구하였다.[9,10]

## 2. 해 석

### 2.1 해석 모델

본 논문에서는 2D 해석이 선행되고 3D 해석을 수행한다. 그리고 von Mises 응력과 접촉 응력 값을 비교 검토한다. Fig. 4 에서 보듯이 2D와 3D 해석 시에는 Case 1-3으로 조립 틈새를 0.25, 0.5, 0.75 mm 3가지 경우를 비교하고, 마지막으로 이물질이 삽입이 된 3D해석 모델은 Case 1-10으로 조립 틈새 별 0.25, 0.4, 0.45, 0.475, 0.5, 0.525, 0.55, 0.575, 0.6, 0.75

mm 로 10 가지 경우로 해석을 수행하였다. 상용프로그램인 ABAQUS로 해석을 수행하였다. 이때, 2D의 경우는 ABAQUS 내의 역지끼워맞춤 해석 기법을 사용하였고, 3D는 강제 변위를 적용하여 해석 하였다.

2D의 해석에 사용된 오링의 요소 종류는 CPE4RH이며 808개로 생성하였다. 구조물 Cylinder와 Piston은 Rigid wire로 모델링 하였다.

두 번째 3D해석의 경우 2D와 동일하다. 단, 두께는 1 mm이다. Cylinder의 요소 종류는 C3D8R이며 10,406개로 생성하였다. 오링의 요소 종류는 C3D8RH이며 7,491개로 생성하였고, 접촉이 이루어지는 외경으로 유한요소격자를 조밀하게 생성하였다. Piston의 요소 종류는 R3D4로 Rigid로 모델링 하였다.

마지막 이물질이 삽입된 3D의 해석에서 요소 종류는 전 해석과 동일하며, 개 수 차이가 난다. Cylinder에서 정확한 값을 얻기 위하여 이물질과 접촉이 되는 부분에 조밀하게 요소를 생성하였고 71,808개 이다. 오링 또한 요소 수가 증가하였고 32,895개 이다. 이물질과 Piston은 Rigid로 모델링 하였다.

이물질은 머리카락 굵기(100  $\mu\text{m}$ )를 기준으로 하여 원형의 이물질로 모델링 하였다. 또한 고무 오링과 구조물들에 비하여 상대적으로 단단하므로 강체로 처리하였다.

모든 부품 간에는 작동유가 존재하므로 마찰계수는 0.1로 설정하였다.

## 2.2 재료 특성

Table 1 에서 기계적 물성치를 확인할 수 있다. 오링은 고무 물성치를 적용하였다. 고무는 탄성을 가지고 있지만 하중과 변형이 선형적이지 않고 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성체(Hyperelastic material)의 성질을 가지고 있다. 고무와 같은 초탄성 특성을 나타내는 재료의 거동에 대해서는 일반적인 미소변형의 응력-변형률 식이 아닌 주신장률-변형률에너지포텐셜의 식으로 표현된다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_3\lambda_1 \quad (3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (4)$$

여기서  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  는 주신장률(principal stretch)이다. 재료를 비압축성으로 가정하면  $\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$ 이며, Mooney-Rivlin model 또는 Ogden model로 나타낼 수 있다.

Mooney-Rivling model

$$W = W(I_1, I_2) = \sum_{i+j}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (5)$$

Ogden model

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (3)$$

여기서  $C_{ij}, \alpha_n, \mu_n$  은 시험결과로부터 결정할 수 있는 재료상수이며, 인장시험, 압축시험, 전단시험 등으로부터 얻을 수 있다.[12-14]

본 연구에서는 이 단축인장 시험결과를 ABAQUS에 입력하여 Mooney-Rivlin 모델의 상수 값을 구하여 해석에 사용하였다.

## 2.3 O-ring 설계 인자

본 연구에서 사용되어진 오링은 sealink사의  $\varnothing 5.00$  mm 의 단면이 원형인 모델이다. 구조물에 대해 오링을 선택하지 않았다. 오링에 맞춰서 구조물을 모델링하여 연구에 적용하였다. 역으로 한 이유는 구조물에 맞춰서 오링을 선택을 하게 된다면, 구조물과 오링의 모델링이 복잡해지므로, 최대한 간단한 모델을 적용하기 위해 오링을 기준으로 모델링 하였다. 설계 기준은 KS, JIS 규격에 의해 설계하였다. Fig. 3 에서 오링의 설계 기준을 확인할 수 있다.

Table 1 Material property

Rubber (O-ring)		
C10	C01	Density
2.746	4.3597	0.0425 kg/m <sup>3</sup>
Aluminum (Piston, Cylinder)		
Young's Modulus	Poisson's ratio	Density
68.9 GPa	0.3	2700 kg/m <sup>3</sup>

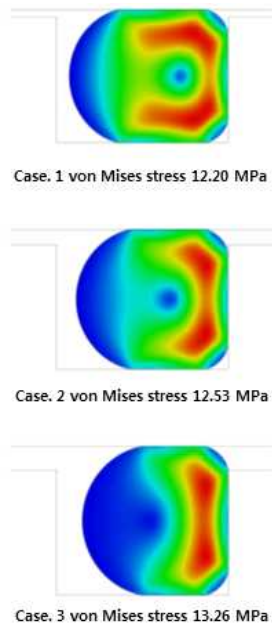


Fig. 5 Stress result of 2D analysis

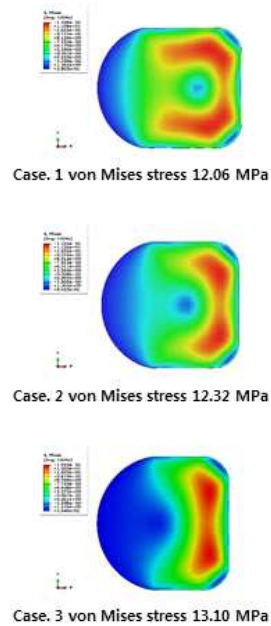


Fig. 7 Stress result of 3D analysis

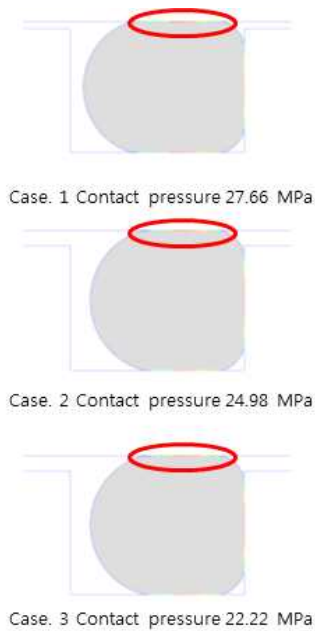


Fig. 6 Contact pressure result of 2D analysis

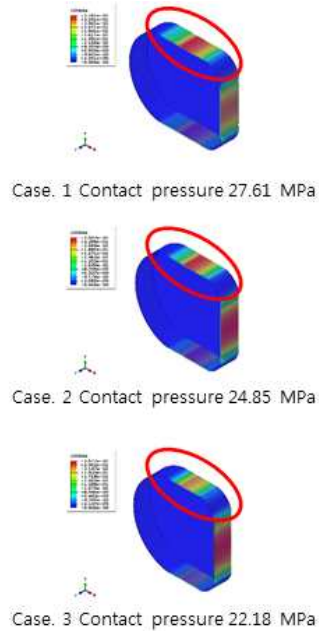


Fig. 8 Contact pressure result of 3D analysis

### 3. 결과 및 토의

본 논문에서는 동일한 모델로 2D와 3D의 von Mises 응력과 접촉 응력 결과 값을 비교하고 3D 해석의 타당성을 검토한 뒤 이물질이 삽입되었을 오링의 성능과 구조물에 미치는 영향을 알아보았다.

10가지 경우로 조립 틈새를 차이를 두어 해석의 신뢰성을 높이고자 하였다.

2D에서 Case 1, 2, 3의 접촉 응력 결과는 27.66, 24.98, 22.22 MPa이고, 3D에서 Case 1, 2, 3의 접촉 응력 결과는 27.61, 24.85, 22.18 MPa이다. 오차율은 약 0.2%로 오차는 거의 없다고 볼 수 있다. 즉, 3D해

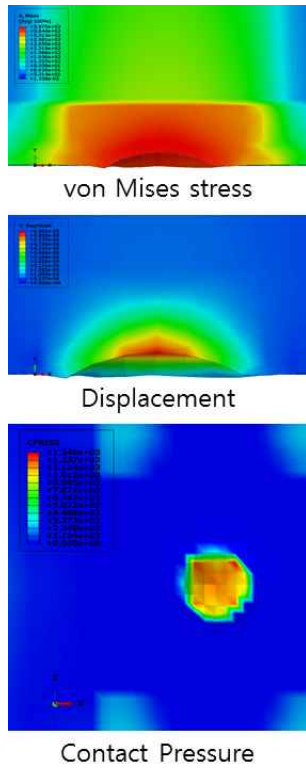


Fig. 9 Result of 3D analysis (Cylinder)

Table 2 Cylinder result

Case	Stress (MPa)	Displacement (μm)	CPress (GPa)
1	397.5	6.33	1.35
2	393.6	5.46	1.47
3	393.1	5.34	1.45
4	392.6	5.21	1.43
5	391.7	5.03	1.41
6	390.8	4.86	1.40
7	390.0	4.70	1.38
8	389.4	4.56	1.48
9	386.3	3.97	1.37
10	383.3	3.37	1.35

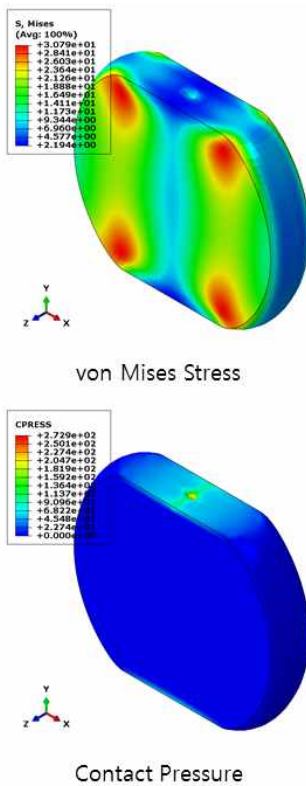


Fig. 10 Result of 3D analysis (O-ring)

Table 3 O-ring result

Case	Stress (MPa)	CPress (MPa)
1	30.79	272.9
2	21.57	240.7
3	20.10	236.0
4	18.97	230.5
5	17.85	225.7
6	16.62	221.8
7	15.46	216.0
8	14.40	211.9
9	12.28	161.3
10	11.88	179.6

석으로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

이물질 3D해석의 결과 값은 Table 2, 3 에서 확인할 수 있다. 우선 Cylinder에서의 결과 값은 조립 틈새가 증가할수록 발생하는 응력과 변위가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이물질에 의한 접촉 응력은 Case 1에서 작은 응력과 Case 8에서 큰 응력이 발생하였다. 이와 같은 결과는 유한요소격자의 품질이 영향을 미칠 수 있고, 그로인해 응력집중현상이 발생할 수 있다.

O-ring에서 발생한 응력은 Aluminum의 항복강도 324.1 MPa 보다 큰 응력이 Case 전체에 발생하여 소성변형이 발생한 것을 확인할 수 있다. 하지만 변위는 약 3~6  $\mu\text{m}$  발생하였다. 이물질을 제외한 O-ring과 Cylinder, Piston의 접촉응력의 평균값은 Case 전체 약 22 MPa 이다.

#### 4. 결 론

2D 해석에서 이물질 삽입 결과는 신뢰성에 분명 문제가 있다. 그 이유는 이물질을 둘러싼 오링이나 구조물의 전 방향을 고려하지 못하기 때문이다.

본 논문에서는 2D, 3D 해석으로 단순 원형 오링의 밀봉 성능을 판단할 수 있으며 또한 이물질에 의한 오링, 구조물의 영향을 알 수 있다.

2D와 3D의 해석 결과 값의 오차율은 약 0.2%로 차이가 없는 것을 검토하였다. 3D 해석에서 간극은 0.25, 0.4, 0.425, 0.45, 0.475, 0.5, 0.525, 0.55, 0.6, 0.75 mm 순서로 Case 1-10 으로 정하였다. 이때, Case 1, 2와 Case 9, 10 의 간극 차이가 0.15 mm 로 가장 크다. 나머지 Case간의 간극 차이는 0.025 mm 이며 Case 8, 9 와 차이는 0.05 mm 이다. 간극 차이가 크면 당연히 응력과 변위 차이 또한 크다. Case 8, 9 의 간극 차이는 0.05 mm 인데 Cylinder에서 발생한 응력과 변위의 차이가 0.15 mm 의 간극 차이와 거의 동일하게 발생하였다. O-ring에서 역시 응력 및 변위 차이가 가장 크게 발생하였다. 응력은 차이가 2.12 MPa, 접촉 응력은 50 MPa로 발생하였다.

성능 부분에서는 평균 접촉 응력이 22 MPa이 발생하였기 때문에 누설은 발생하지 않을 것이라고 판단된

다. 하지만 Cylinder에서 발생한 응력은 항복 강도보다 큰 응력이므로 굽힘이나 찌힘이 발생할 것이라고 판단된다.

이물질의 크기를 머리카락 굵기(100  $\mu\text{m}$ )로 설정하여 연구를 진행하였으나, 이물질은 그 보다 더 큰 경우가 있을 수 있다.

본 논문 결과에서는 이물질이 구조물과 오링의 간극 차이에도 누수 성능에 큰 영향을 미치지 않았다. 이러한 해석 방법을 사용한다면 오링 설계 시 많은 도움이 될 것이라고 판단된다.

2D 해석에서 발생하는 접촉 응력은 신뢰성이 낮는데 2차원적인 접촉만 확인 할 수 있기 때문이다. 3D 해석은 모든 방향에서 응력들을 확인할 수 있으므로 2D보다 적합하다. 하지만 3D의 신뢰성이 확인되지 않았으므로 동일한 모델과 조건으로 결과를 비교하여 신뢰성을 확보하였다.

본 논문에서는 이물질이 없는 경우로만 3D의 신뢰성을 확인하였다. 해석 결과의 오차는 미비하므로, 본 해석 기법을 사용한다면 오링 설계 시 오류를 줄일 수 있다고 사료된다. 하지만 더욱 신뢰성을 높이기 위해 차기 연구에서는 이물질을 포함한 2D와 3D 해석을 비교하여 양질의 결과를 얻어 오링 설계에 반영하면 오링 설계에 많은 도움이 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 중소기업청과 중소기업기술정보진흥원의 “중소기업기술혁신개발사업 투자연계과제” (과제번호: S2370889), 차세대 기계항공 창의인재 양성사업인 B K Plus와 교육부 지방 특성화 사업인 CK-1 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

#### References

- [1] Ellis, R. A. and Keller, JR, R. B., “Solid Rocket Motor Nozzles,” NASA-SP-8115, 1975.
- [2] Allan, J. M., “Lessons Learned but Forgotten from the Space Shuttle Challenger Accident,” Space 2004 Conference and Exhibit, AIAA 2004-5830, pp. 1-10, 2004.

- [3] Lindley, P. B., "Compression Characteristics of Laterally- Unrestrained Rubber O-Rings," *Journal of Industrial Research Institute*, Vol. 1, pp. 209-213, 1967.
- [4] Leachy, J. C., "Sealing with Elastomers and Applications to Valve Seat Design for High Pressure," 5<sup>th</sup> International Conference on Fluid Sealing, pp. 69-88, 1971.6, pp. 283~288, 2012.
- [5] Ebisu, T., Yamamoto, M., Maekawa, J. and Onodera, A., "Fundamental studies on the performance of 'O' ring for cask," PATRAM 83, pp. 672-679, 1983.
- [6] Yokoyama, K., Okazaki, M. and Komito, T., "Effect of Contact Pressure and Thermal Degradation on the Sealability of O-ring," JSAE Review, Vol. 19, No. 2, pp. 123-128, 1998.
- [7] "O링 부착 홈부의 모양 및 치수", KS B 2799
- [8] "운동 및 고정용(원통면) O링 치수", JIS B 2406
- [9] H. D. Jo., H. G. Jung. and T. J. Park., "Contact Analysis between Seal and Steel Counterface Intervened with a Micro Particle," KSME, R2006, 2009
- [10] Tae-Jo Park, Jun-Hyuk Lee., "Sliding Contact Analysis of a Spherical Particle between Rubber Seal and Coated Steel Counterface," KSTLE, Vol. 28, No.
- [11] Pearl, D. R., "O-Ring Seals in the Design of Hydraulic Mechanics," SAE Quarterly Transactions, Vol. 1, No. 4, pp. 602-611, 1947.
- [12] Hooke, C. J., Lines, D. J. and O'Donoghue, J. P., "Elasto-hydrodynamic Lubrication of O ring Seal," Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol. 181, No. 9, pp. 205-223, 1967.
- [13] Cho, H. G., Chae, S. W. and Park, J. J., "A Remeshing Criterion for Large Deformation Finite Element Analysis," J. of KSPE, Vol. 13, No. 10, pp. 78-85, 1996.
- [14] Day, J. R. and Miler, K. A., "Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, an Analytical Verification of an Experimental Technique," ABAQUS Users Conference Proceedings, pp. 205-219, 2000.
- [15] Rivlin, R. S., 1956, "Large Elastic Deformations in Rheology: Theory and Application," Academic Press, New York. Vol. 1.
- [16] Ogden, R. W., 1972, "Large Deformation Isotropic Elasticity-On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubber-like Solids," *Proceedings of Royal Society of London*, Vol. A 326, pp. 565~584.
- [17] Kang, M. G., Tak. S. M., Park. D. J. and Lee. S. S. "The Study of Impact Analysis about Inertia Measure Unit of High Speed along Impact curve," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 29-33, December, 2012.
- [18] Kang, M. G., Park. D. J. and Lee. S. S. "The Study of Aerodynamic about High-speed projectiles using Fluid Structure Interaction analysis," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 7-11, December, 2012.
- [19] Inseok Pack, Heejang Rhee and Seoksoon Lee., "Study on the Performance of Elastomeric O-ring subjected to Foreign Object using Finite Element Analysis," *The Society for Aerospace System Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 52-58, 2016